第40卷 第7期
2023年7月
干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH
Vol. 40 No. 7
Jul. 2023

昆仑山冰湖分布时空特征及驱动力

孟乘枫[1]， 仲 涛[1]， 郑江华[1,2]， 王 南[1]， 刘泽轩[1]， 任祥源[3]

（1. 新疆大学地理与遥感科学学院，新疆 乌鲁木齐 830017；2. 新疆大学绿洲与生态重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830017；3. 新疆大学生态与环境学院，新疆 乌鲁木齐 830017）

摘 要：探究昆仑山冰湖变化特征对区域生态环境和发展至关重要。基于Google Earth Engine（GEE）遥感云平台进行监督分类，研究昆仑山近20 a的冰湖分布面积和数量变化情况，并结合气温、降水和冰川面积进行驱动力分析。结果表明：（1）2000—2020年昆仑山地区冰湖数量增加39.25%，面积增加81.35%，呈西多东少的分布特征。（2）昆仑山地区面积小于0.1 km^2的冰湖对气候变化更敏感，增长速度最快；昆仑山冰湖主要集中在海拔4600~5600 m，冰湖数量和面积分别占总量的71.58%和70.51%。（3）2000—2020年昆仑山地区气温降低3.45%，降水减少6.27%，冰川面积减少了21.15%，冰川融化产生的冰川融水是冰湖增长的主要原因。研究结果可为干旱区水资源的保护和利用、灾害预警等方面提供科学支撑。

关键词：遥感；昆仑山冰湖；GEE；气候变化；驱动力分析

冰湖是以现代冰川融水为主要补给源或在冰碛垄洼地内积水形成的天然水体[1]。冰湖对气候变化高度敏感，是全球气候变化监测的重要组成部分。古冰川和现代冰川在亚洲高海拔地区造就了众多冰湖，在全球气候变暖的背景下，中国西北地区从20世纪80年代开始有暖干向暖湿转变的趋势[2]，西北部高海拔地区冰川整体呈现出萎缩、变薄的趋势[3-4]，可能导致冰湖溃决洪水及泥石流等灾害的发生[5]，对下游人类活动构成潜在威胁。因此，探讨河源区冰湖变化特征及影响对于了解冰冻圈气候环境变化及灾害风险评估有着重要意义。

目前，中国开展的冰湖变化遥感监测主要集中于喜马拉雅山[6]及其子区域（叶如藏布流域[7-8]、波曲河流域[9]、科西河流域[10]、希夏邦马峰[11-12]）、念青唐古拉山子区域（念青唐古拉山西段[13]、帕隆藏布江上游[14]）、青藏高原（布加岗日[15]、那曲[16]、尼都藏布流域[17]、彼得藏布流域[18]）、帕米尔高原[19]、喀喇昆仑山[20]、天山山脉[21]、阿尔泰山[22]等区域。对于冰湖研究的侧重点主要包括：基于遥感的冰湖信息提取方法及应用[23-25]，冰湖对区域气候变化响应的时空特征分析及影响因素分析[26-27]，典型区域潜在危险性冰湖的识别、特征分析与预测[28]，冰湖溃决灾害风险评估与预警等[29-30]。研究表明，喜马拉雅山区新生冰湖扩张速率为每年0.96 km^2，其中冰川补给湖面积增长占增长总量的75.4%，证实了冰川融水在冰川湖泊扩张中的主导作用[31]。自20世纪80年代全球变暖以来，青藏高原地区冰川一直处于负平衡状态，1990—2010年青藏高原冰湖面积增加128.5 km^2[32]。同样受到气候变暖和冰川退缩的影响，天山冰湖面积每年平均以0.689 km^2或0.8%的速度扩张[21]。

昆仑山位于中国西北部的干旱半干旱地区，跨经度范围大，气候要素变化具有区域性特征，开展昆仑山冰湖变化监测一方面可以为干旱区水资源的合理开发利用提供参考，另一方面可为冰湖溃决灾害风险评估提供数据支撑。当前对昆仑山整体冰湖变化特征缺乏全面认识，因此，本文基于GEE以2000—2020年的Landsat遥感数据开展昆仑山冰湖遥感监测，分析近年来昆仑山冰湖时空变化特征，同时结合气象数据，探究冰湖变化的影响因素。

收稿日期：2023-03-27； **修订日期：**2023-05-04
基金项目：国家级大学生创新研究项目（202110755126）；新疆“天山雪松计划”项目（2020XS04）
作者简介：孟乘枫（2001-），女，主要研究方向为资源环境遥感. E-mail: mcfeng2001@163.com
通讯作者：郑江华. E-mail: Zheng_jianghua@126.com

1 研究区概况

昆仑山西部与帕米尔高原相接,东部以青海省东南部为界,北部与塔里木盆地和柴达木盆地相连,南部与西藏自治区西北部相接(图1)。昆仑山脉是一个东西走向的山脉,位于34°~40°N,75°~100°E之间,全长约2500 km,宽130~200 km,相比较而言,西部比东部窄,平均海拔超过了4000 m,总面积约50×10^4 km^2[33]。昆仑山脉西高东低,地形以较为陡峭的山坡和较为高大的山峰为特点,存在较多山体与斜坡。虽然昆仑山冰湖接纳一些雨水,但其主要由积雪和冰川供水,流量遂因季而异,夏季冰雪的强烈融化是冰湖水补给的主要来源。研究区东西跨度大,气温、降水等气候条件差异较大,为便于观察冰湖对气候的响应,研究常把昆仑山分为东、中、西三部分。由于中部、东部地区冰湖分布较少,本文在张连成等[34]的研究基础上,将昆仑山中部与东部合并,以81°E为界线把昆仑山地区分为东西两部分。

2 数据来源与方法

2.1 数据来源

遥感影像数据来源于GEE平台,获取了2000—2020年逐年Landsat系列卫星数据,用于提取研究区的冰湖轮廓范围[35]。同时,为了减小季节差异对冰湖面积变化带来的影响,降低山区因云量过高而对遥感影像解译造成的误差,确保图像的分辨率,故大部分选取云量较少、冰湖变化稳定的9—10月影像进行处理[36]。其中,2000年、2004—2007年、2013年由于数据缺失扩展了影像的采集时间(8—11月)。

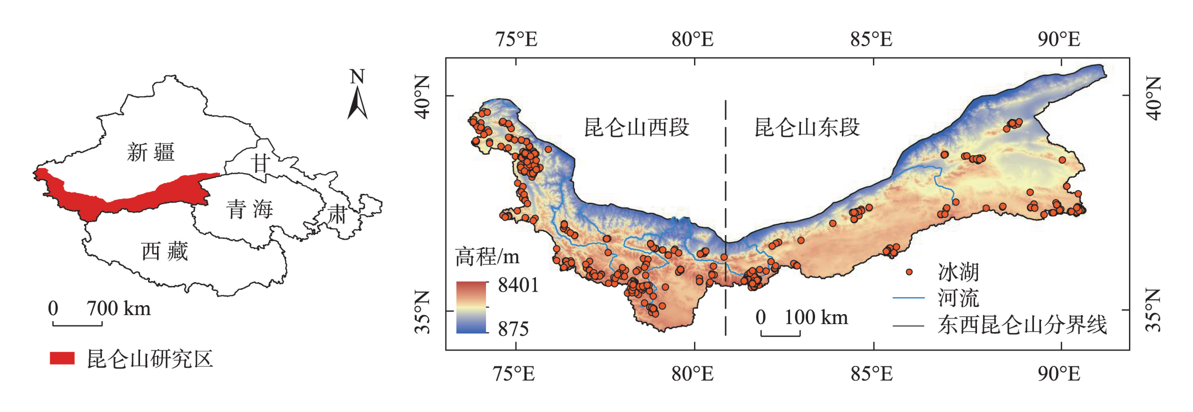
DEM数字高程数据采用覆盖中国昆仑山地区范围内的数字高程数据产品SRTM DEMUTM,数据的空间分辨率为90 m,可以满足山区复杂地形条件下的DEM需求,用于提取研究区的海拔、坡向、山体阴影等地形因子,从而对冰湖分布进行空间分析,获取自中国地理空间数据云(http://www.gscloud.cn/)。

气象观测数据选取FLDAS数据集(https://disc.gsfc.nasa.gov/)2000—2020年近20 a的气温和降水数据,时间分辨率为1个月,空间分辨率为0.1°×0.1°。

冰川冰湖编目数据使用GLIM全球冰川编目数据以及2017—2018年中国西北冰川编目数据[37],空间分辨率为30 m。冰湖编目数据使用高亚洲冰湖编目数据集(http://www.ncdc.ac.cn)。

2.2 研究方法

2.2.1 基于GEE遥感云计算平台的影像监督分类　本文基于GEE平台的Landsat-5/7/8遥感影像,通过去云函数进行无云影像的合成,以保证研究区影像质量。其次,在合成影像上选取一定数量均匀随机分布的样本点,分别为植被、裸地、积雪、冰湖4类。筛选其中70%的样本,使用Random Forest(RF,随机森林)进行影像分类,另外30%样本点用于精度验证(图2)。随机森林法具有人工干预少、分类效果明显、运算效率高等优点。构建混淆矩阵,进行精度检验,计算总体分类精度(Overall Accuracy,OA)平均值为0.92,Kappa系数平均值为0.89。将提取得到的冰湖边界进行矢量化,进行人



注:底图采用自然资源部标准地图制作,审图号为GS(2019)3333号,对底图边界无修改。下同。

图1 研究区示意图

Fig. 1 Map of the study area

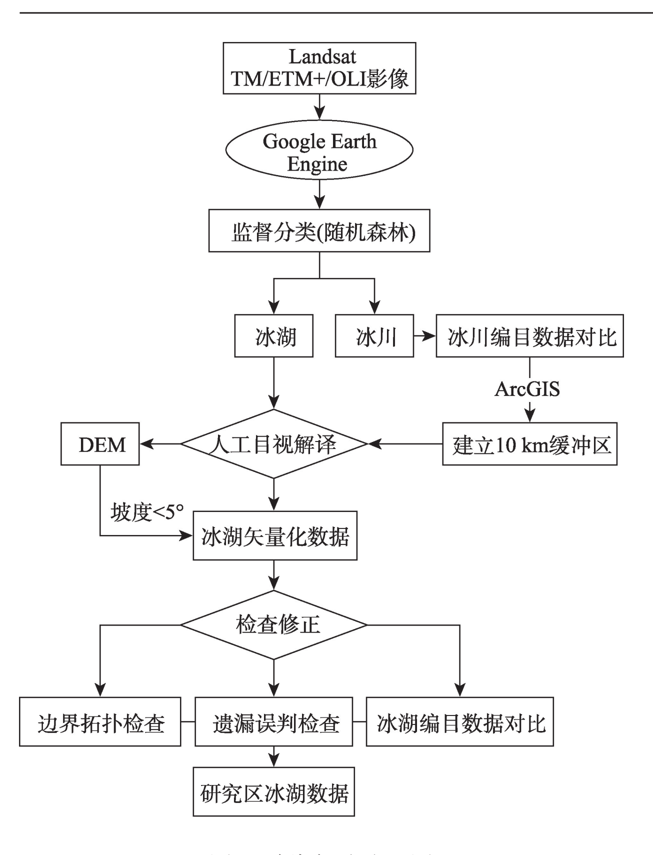


图2 冰湖提取流程图

Fig. 2 Flow chart of glaclake extraction

工目视解译,以消除山体阴影造成分类误差产生的影响。

从基于GEE得到的影像监督分类结果中提取出冰川、冰湖,将得到的冰川数据与2015年冰川编目数据进行对比[9],得到具有可靠性的冰川数据后,以冰川末端为中心建立10 km缓冲区[38]。对冰湖数据进行目视解译,以初步消除山体阴影。之后与DEM生成的坡度图和冰川缓冲区进行叠加分析,进行二次精提取,并删除面积小于0.01 km^2的错分冰湖[39]。提取出的冰湖与高亚洲冰湖编目数据进行对比,冰湖面积误差为8.69%,冰湖数量误差为9.07%,在可接受范围之内。

2.2.2 Sen+Mann-Kendall Theil-Sen斜率估算和Mann-Kendall显著性检验是两种非参数检验方法[40]。Sen趋势度是经过计算序列的中值,其可以很好地减少噪声的干扰。计算公式为:

$$\beta = \mathrm{Median}\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right),\quad \forall j > i \tag{1}$$

使用趋势度β来判断时间序列的升降。$\beta>0$时,时间序列呈上升趋势,反之,呈下降趋势。

而Mann-Kendall方法本身对序列分布无要求且对异常值不敏感[41],Mann-Kendall趋势检验统计量S计算方法为:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=i+1}^{n}\mathrm{sgn}(x_i - x_j) \tag{2}$$

其中,

$$\mathrm{sgn}\left(x_j - x_i\right) = \begin{cases} +1, & x_j - x_i > 0 \\ 0, & x_j - x_i = 0 \\ -1, & x_j - x_i < 0 \end{cases} \tag{3}$$

选取时间序列长度n=21(2000—2020年),统计量S近似服从标准正态分布,使用检验统计量Z进行趋势检验,检验中取显著水平$\alpha=0.05$,$Z_{1-\alpha}=Z_{0.975}=1.96$。$Z$值由以下公式计算:

$$Z = \begin{cases} \dfrac{S-1}{\sqrt{\mathrm{var}(S)}}, & S>0 \\ 0, & S=0 \\ \dfrac{S-1}{\sqrt{\mathrm{var}(S)}}, & S<0 \end{cases} \tag{4}$$

$$\mathrm{var}(S) = \frac{[n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^{m} t_i(t_i-1)(2t_i+5)]}{18} \tag{5}$$

式中:n是序列中数据个数,m是序列中结(重复出现的数据组)的个数,t_i是结的宽度(第i组重复数据组中的重复数据个数)。对Z值进行双边趋势检验。在Matlab中运用该方法完成对研究区气温和降水的趋势分析和显著性检验。

2.2.3 Person相关系数 Person相关系数又称为Person积矩相关系数,用于度量两个变量X和Y之间的线性相关性,通常用r来表示,r为两变量间协方差和标准差的商,公式为:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(X_i - \bar{X}\right)\left(Y_i - \bar{Y}\right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(X_i - \bar{X}\right)^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(Y_i - \bar{Y}\right)^2}} \tag{6}$$

Person相关系数进行相关性分析的约束条件为两变量独立;两变量均为连续变量;两变量均符合正态分布且二元分布也符合正态分布;两变量之间有线性关系。r值为[−1,1]区间,其绝对值越大,变量之间的相关性就越强;r=0时,表示两变量不存在线性相关;r=1时,表示两变量呈完全正线性相关;r=−1时,表示两变量呈完全负线性相关。

3　结果与分析

3.1　昆仑山冰湖变化时空特征分析

3.1.1　昆仑山冰湖数量和面积总体变化特征　近20 a昆仑山地区冰湖总体表现出数量增多、面积增大的趋势，且二者的变化表现出一致性(图3)。2000年该地区共有冰湖642个，冰湖面积共计28.03 km^2;2020年冰湖数量增长至894个，总面积达50.83 km^2。冰湖的总数量增加了39.25%，总面积增加了81.35%，平均以每年2.22%和3.65%的速度增加。昆仑山冰湖面积平均每年扩张1.09 km^2，与高亚洲冰湖变化趋势一致，扩张速率低于帕米尔高原—兴都库什山—喜马拉雅与青藏高原地区冰湖面积年均扩张速率(6.43 $km^2 \cdot a^{-1}$)[32]。

昆仑山冰湖的变化整体可分为两个阶段，第一个阶段是2013年之前，冰湖总量较少、总面积较小，数量年际变化明显，出现周期性的先升高后降低现象。如，2000—2004年、2004—2009年、2009—2013年，冰湖数量增加，后经历2~3 a的回落，又降低至升高前水平。第二个阶段是2014—2020年，冰湖数量在2014年大幅增加后持续稳定增长。冰湖面积无显著变化，呈平稳增加趋势。

3.1.2　昆仑山不同区域冰湖变化特征　以81°E为界将昆仑山分为东西两部分，分别讨论各区域冰湖数量和面积变化情况。结果表明，研究区冰湖数量与面积均呈西多东少的分布特征(图4)。2020年，

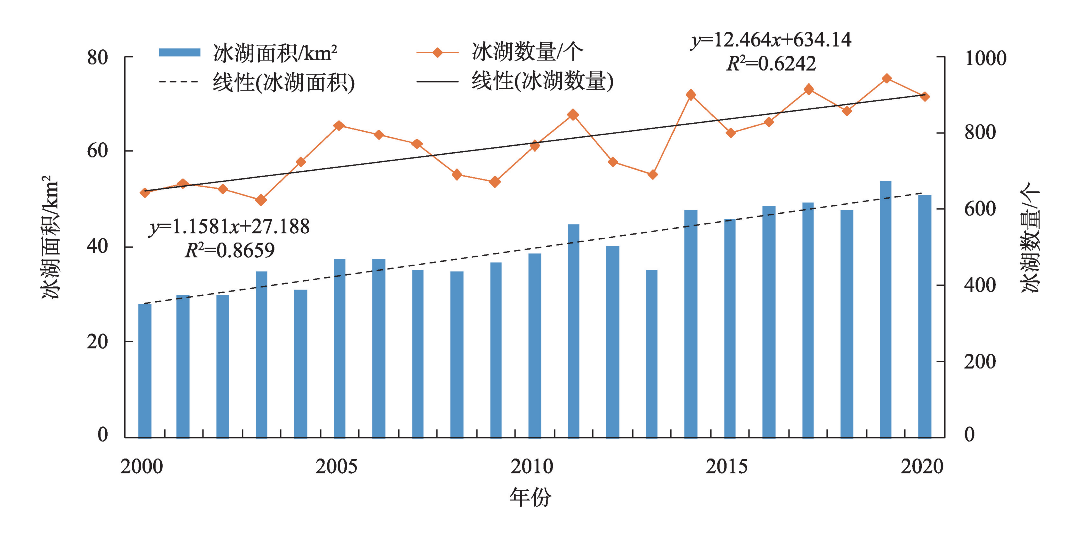


图3　2000—2020年昆仑山地区冰湖数量与面积变化统计

Fig. 3　The number and area change statistics of glacial lakes in Kunlun Mountains from 2000 to 2020

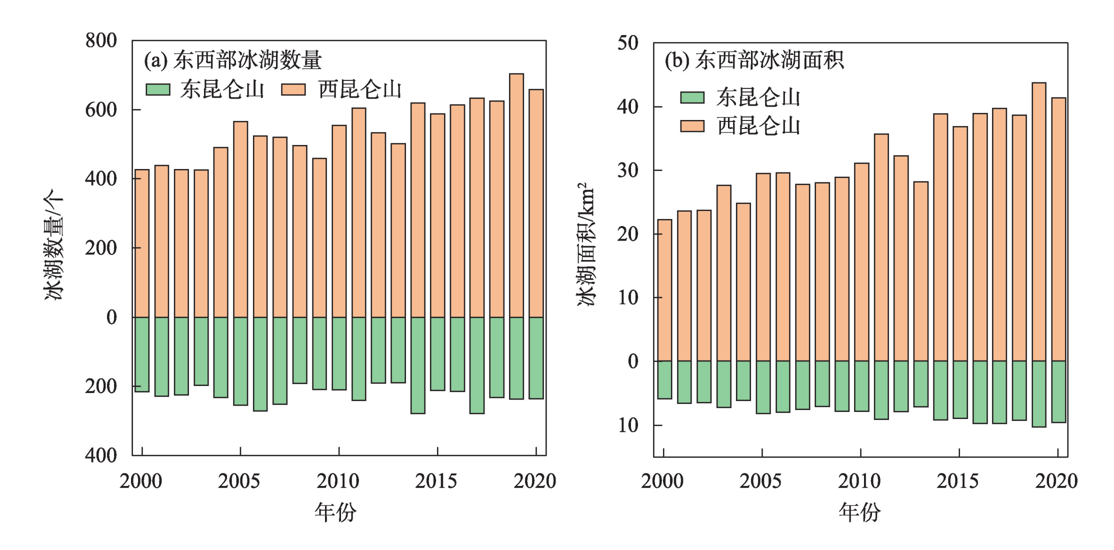


图4　2000—2020年昆仑山地区东西部冰湖数量与面积对比

Fig. 4　Comparison of the quantity and area of glacial lakes in eastern and western Kunlun Mountains from 2000 to 2020

西昆仑山冰湖数量占总量的73.60%，冰湖面积占总面积的81.11%。西部山区海拔高，冰川覆盖面积广阔，山谷间常有积雪融水聚积，适宜冰湖的发育和扩张。而东部地势较为平坦，多发育有以降水为主要补给的大型湖泊。从冰湖数量和面积变化的绝对量来看，西部冰湖的数量和面积增长剧烈，成为研究区冰湖数量和面积增加的主要成分。近20 a，西昆仑山冰湖平均以每年11.6个的速度增长，东部年均冰湖增长数接近于0，甚至有大量年份出现负增长现象。东、西昆仑山冰湖面积变化基本一致，西昆仑山面积年均增长率为4.26%，东昆仑山面积年均增长率为3.78%。总体而言，西昆仑山冰湖所占比重大，增长快，在未来也具有很大的扩张潜力。

3.1.3 昆仑山不同规模冰湖变化特征 由于研究区范围较大，地形复杂，昆仑山冰湖规模差异大，面积最小的约0.01 km²（2000年），最大冰湖面积可达9.53 km²（2020年），近20 a面积平均值为39.93 km²。其中，绝大多数冰湖为面积小于0.1 km²的小型冰湖。

分析发现，不同规模的冰湖数量变化趋势具有一致性，均与冰湖总数的变化曲线相吻合（图5）。面积小于0.1 km²的冰湖数量最多，平均占冰湖总数量的84.36%，面积超过0.2 km²的冰湖数量仅占6.80%，面积越大的冰湖，数量越少。从不同规模面积总和来看，大于0.2 km²的冰湖占比最大，可达55.17%；其次为面积小于0.1 km²的冰湖，平均占比为26.03%，0.1~0.2 km²的冰湖面积所占比重最小。面积小于0.1 km²的小规模冰湖数量最多，增长速度最快，数量平均增长速度为每年13.45个，演化更为激烈。0.1~0.2 km²的冰湖数量近20 a表现为负增长趋势，该类冰湖多位于较高海拔地区，水分补给受冰川退缩等因素的影响，出现消退甚至消失。由此，昆仑山小规模冰湖演化更为激烈，对气候及其周围环境变化敏感，与Chen等[42]认为高亚洲地区小规模冰湖（≤0.04 km²）增长最为明显的观点具有一致性；大规模冰湖调蓄能力更强，不易随外界因素产生变化。

3.1.4 昆仑山不同海拔冰湖变化特征 高山地区的冰湖形成多与冰湖周边地形相关[29]。为了进一步分析不同海拔地区冰湖的分布和变化，本研究以200 m间距对冰湖分布的海拔区间进行了划分（图6）。统计结果显示，近20 a中国昆仑山地区冰湖海拔分布的下限为3200~3400 m，分布上限为5800~6000 m，略低于青藏高原内陆地区冰湖分布的最高海拔（2020年青藏高原冰湖分布最高海拔为6254 m）[43]。大量冰湖集中分布于4600~5600 m，数量和面积分别占全部的71.58%和70.51%。这是由于研究区冰川主要分布于海拔4000~6000 m，冰川面积退缩主要集中于4500~5500 m，超过此范围冰川面积几乎无变化[2]。昆仑山最大积雪量位于海拔5500 m左右，由于积雪主要来源于高海拔地区的固态降水，可推测研究区海拔5500 m处存在最大降水带[44]。充足的冰川融水、固态降水等补给来源是该海拔区间冰湖分布较高的重要原因。

研究区冰湖数量呈现近似正态分布，在4800~5000 m范围分布最多，平均数量为137个，约为总数的17.84%。冰湖面积主要分布于5200~5400 m，平均面积达到8.11 km²，约为总面积的20.32%。从变化趋势上看，冰湖数量增加集中于海拔4800~5000 m，数量增加了46个，约为总增长量的18.25%，冰湖

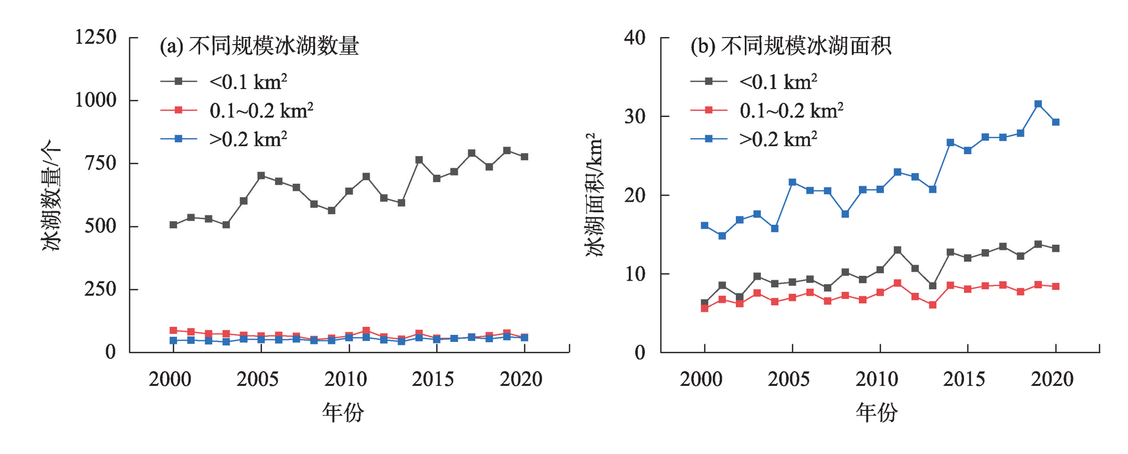


图5 2000—2020年昆仑山地区不同规模冰湖数量与面积对比

Fig. 5 Comparison of the quantity and area of different scale glacial lakes in Kunlun Mountain area from 2000 to 2020

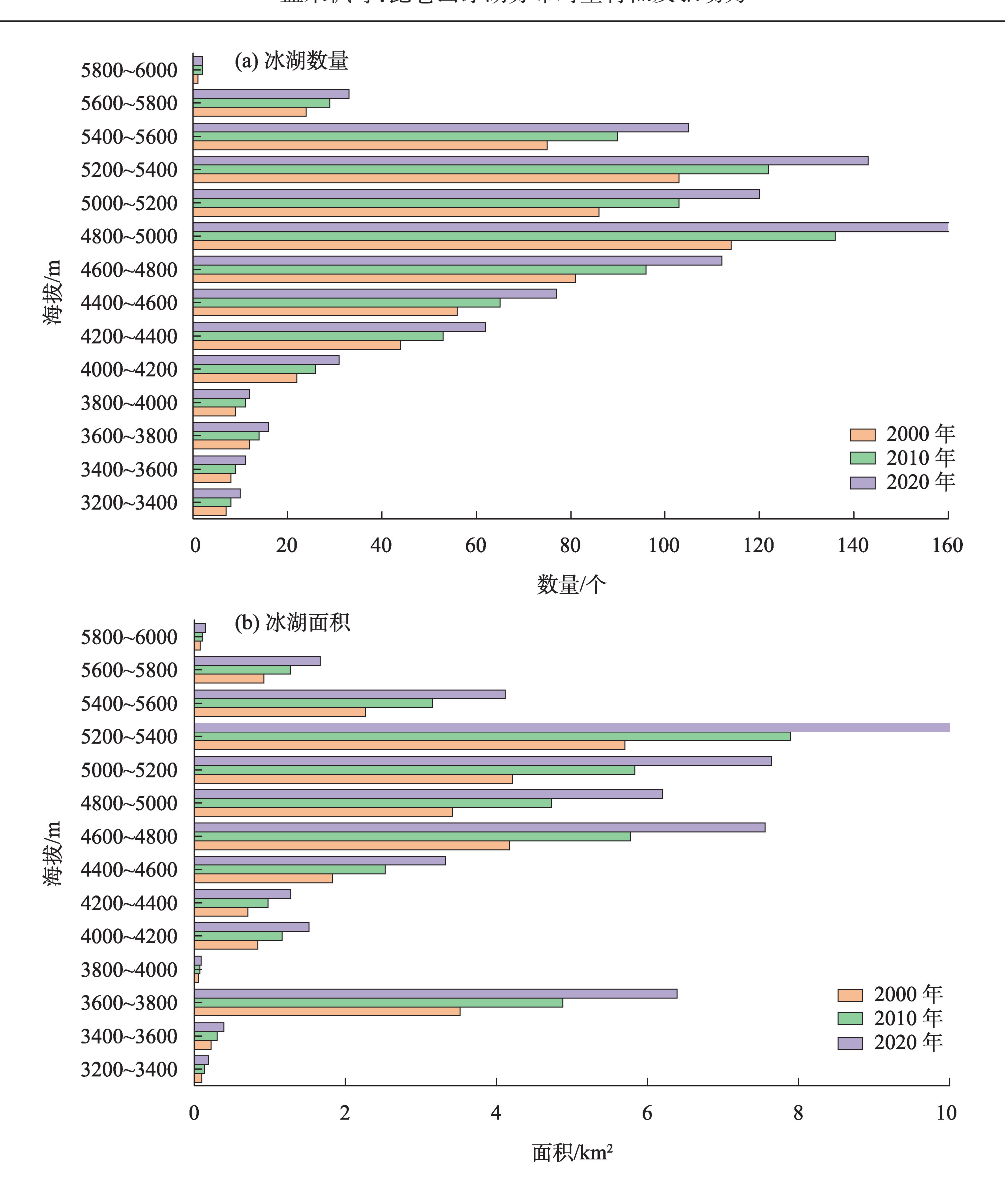


图6　2000—2020年昆仑山地区不同海拔冰湖数量与面积统计

Fig. 6　Statistics on the number and area of glacial lakes at different elevations in Kunlun Mountains from 2000 to 2020

面积扩张集中于海拔5200~5400 m,约为面积增长总量的20.32%。

以2020年为例,对昆仑山不同区域和不同规模冰湖在不同海拔的分布情况进行了统计分析(图7)。对于不同区域冰湖而言,东昆仑山冰湖数量分布峰值位于海拔4800~5000 m,冰湖面积分布峰值位于海拔3600~3800 m,在此区间内,东部冰湖面积为西部冰湖的4.97倍。造成以上特征的主要原因是东昆仑山北坡受第四纪以来地质断陷、冰川侵蚀、冰碛阻塞等的影响[45],在3600~3800 m范围形成了多个面积较大的冰碛阻塞湖,导致该海拔区间东昆仑山冰湖面积异常升高。西昆仑山冰湖数量和面积分布峰值均位于海拔5200~5400 m,向两端呈近似递减分布。

对于不同规模冰湖而言,小于0.1 km^{2}冰湖数量和面积分布峰值分别位于4800~5000 m和5000~5200 m,0.1~0.2 km^{2}冰湖数量和面积分布峰值均位于5200~5400 m,由于东昆仑山大面积冰碛阻塞湖的存在,大于0.2 km^{2}冰湖面积分布峰值位于3600~3800 m。小规模与中等规模冰湖易于形成和相互转化,主要由地质历史时期冰川剥蚀作用产生的河槽洼地积水而成[46],一般临近冰川/雪线或位于其上方的较高海拔区域。大规模冰湖的形成对于地形和水热条件有较高要求,昆仑山雪线分布高度介于4800~5300 m[33],印度季风和太平洋季风越过青藏高原到达昆仑山时影响已经很微弱,仅可形成少量

降水，故大规模冰湖多分布于相对湿热的低海拔区域。

3.2 昆仑山冰湖分布变化驱动力分析

3.2.1 气候变化对昆仑山冰湖变化的影响 近20 a昆仑山地区气温下降3.45%，降水减少6.27%，气温和降水数据在一定程度上可以反映该地区气候变化状况（图8）。研究区气温无明显变化趋势，在2012年开始上升。气温变化趋势图直观的反映了昆仑山气温的时空演变情况（图9），多数区域气温无显著变化，东部少数区域呈不显著增温，稳定的气温可为冰湖的形成和发展提供条件。西昆仑山部分区域气温略有降低，可能导致降雪无法转化为冰雪融水，从而限制冰湖的形成，使该地部分冰湖数量和面积的增长率有所下降。

昆仑山降水量呈非线性变化，2003年、2005年、2010年出现突增，近10 a年均降水量（159 mm）较前10 a（164 mm）略有降低。由降水量变化趋势图可直观看出，东昆仑山降水量普遍减小，东南部少数区域呈小范围不显著增加趋势，而昆仑山东部的冰湖主要集中在这一区域，且均为面积较大冰湖。西昆仑山大范围地区降水量保持增加，在78°~80°E降水量增加呈极显著，由于降水的大幅增长，为该地区冰川发育提供了充足补给，间接导致冰湖面积扩张，面积增长率逐年升高。

3.2.2 冰川变化对昆仑山冰湖变化的影响 由于昆仑山地区气候严寒干旱、降雨稀少、蒸发强烈，冰川融水是昆仑山冰湖补给的主要形式[47]。随着全球气温升高，高亚洲地区冰川快速退缩[48-49]，冰川的变化成为影响冰湖变化的重要因素之一。本研究通过GEE监督分类提取得到研究区冰川，并与中国西

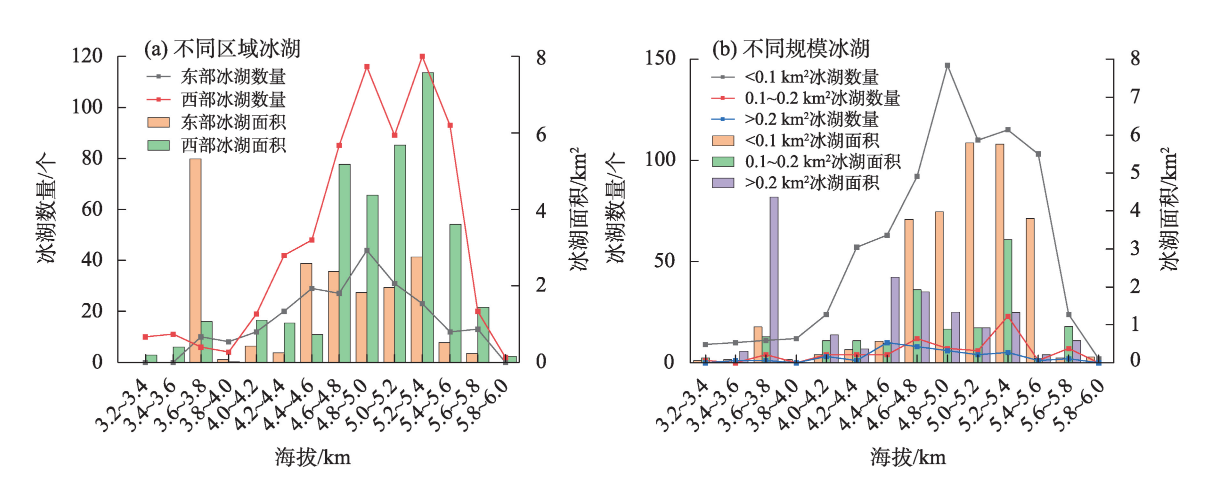


图7 2020年昆仑山不同区域与不同规模冰湖海拔分布统计

Fig. 7 Elevation distribution of different regions and glacial lakes of different sizes in Kunlun Mountain in 2020

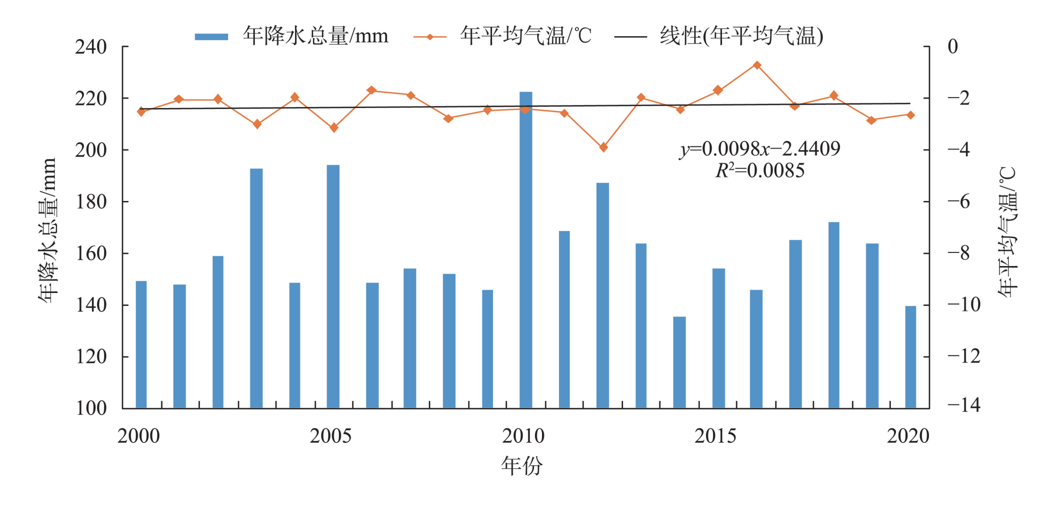


图8 2000—2020年昆仑山年平均气温与年降水量变化情况

Fig. 8 Changes of annual mean temperature and annual precipitation in Kunlun Mountains from 2000 to 2020

北冰川编目数据(2015年)进行对比,确保结果可信后统计该区域的冰川面积变化。由冰川分布图可知(图10),昆仑山冰川多分布于高海拔的西昆仑山地区,即为研究区冰湖数量最多、增长最快区域。冰川面积统计结果显示,近20 a昆仑山冰川面积持续退缩,2000年昆仑山冰川面积为12739.46 km²,在2020年下降至10045.51 km²,共减少21.15%。2000—2004年、2004—2009年冰川面积均表现为先升高后缓慢降低的趋势。2010—2020年,冰川面积持续降低,年平均减少率为2.12%。

3.2.3 气温、降水和冰川面积与昆仑山冰湖的相关性 采用皮尔逊相关系数法探究了气温、降水和冰川面积与总冰湖及不同区域、不同规模、不同海拔冰湖之间的相关性(表1)。结果表明,冰湖与气温和降水均不呈显著相关,与冰川面积多表现为较强的相关性。东昆仑山距离冰川边缘较远,冰湖多来源于冰川槽谷中受崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害淤堵主沟道而形成的堰塞湖[46],故东昆仑山冰湖数量与冰川面积不呈现显著相关。规模大于0.1 km²的冰湖多由小规模冰湖间接发育形成,故与冰川面

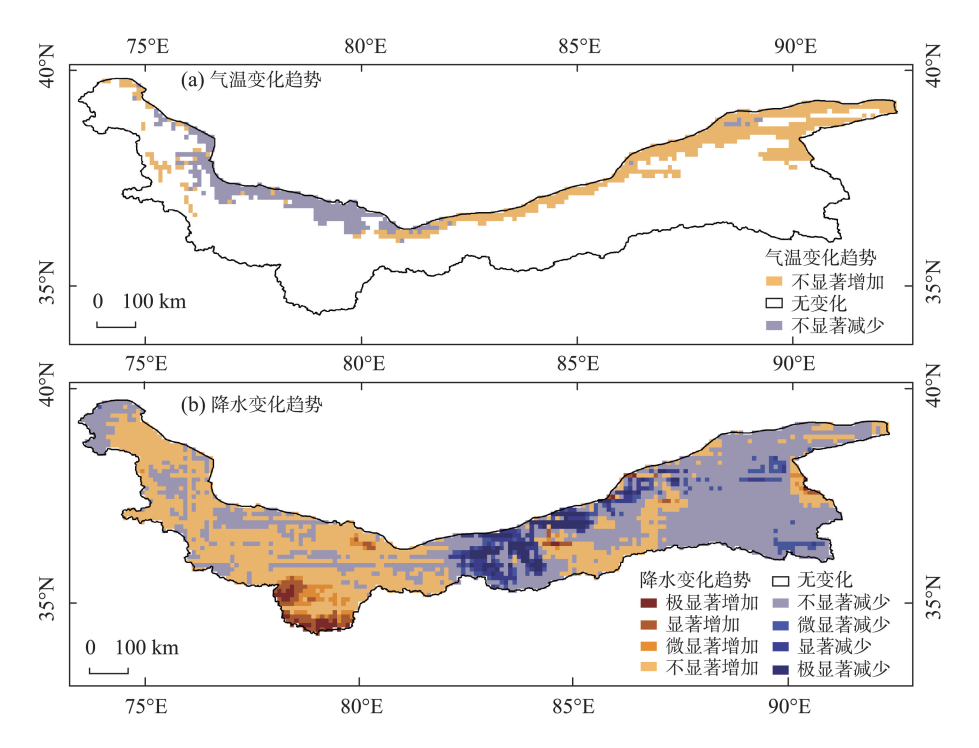


图9 Sen+Mann-Kendall法昆仑山地区气温、降水变化趋势

Fig. 9 Variation trend of temperature and precipitation in Kunlun Mountain area

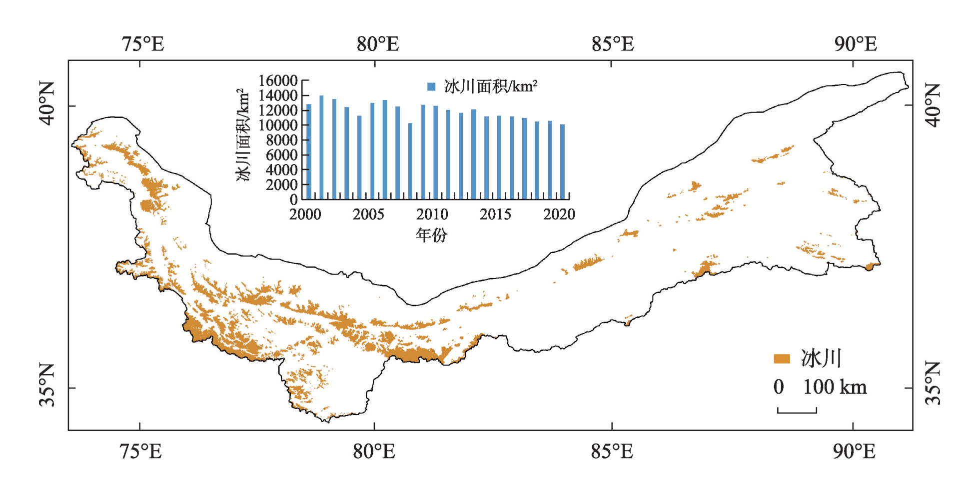


图10 昆仑山地区2015年冰川分布及2000—2020年冰川面积统计

Fig. 10 Glacier distribution map of Kunlun Mountain region in 2015 and statistical map of glacier area from 2000 to 2020

表1 气温、降水和冰川面积与昆仑山冰湖的相关关系

Tab. 1 Correlation of temperature, precipitation and glacier area with glacial lakes in Kunlun Mountains

		气温与冰湖数量	气温与冰湖面积	降水与冰湖数量	降水与冰湖面积	冰川面积与冰湖数量	冰川面积与冰湖面积
总冰湖		0.095	0.052	−0.085	−0.048	−0.573**	−0.702**
不同区域冰湖	东昆仑山	0.178	0.079	−0.264	−0.021	0.031	−0.594**
	西昆仑山	0.054	0.046	−0.013	−0.054	−0.687**	−0.721**
不同规模冰湖	<0.1 km^2	0.114	0.001	−0.090	−0.021	−0.612**	−0.729**
	0.1~0.2 km^2	−0.166	0.044	0.016	0.012	−0.401*	−0.556**
	>0.2 km^2	0.057	0.073	0.005	−0.070	−0.467*	−0.673**
不同海拔冰湖	3.2~3.4 km	0.115	0.039	−0.104	−0.137	−0.609**	−0.697**
	3.4~3.6 km	0.107	0.036	−0.113	−0.039	−0.613**	−0.708**
	3.6~3.8 km	0.073	0.051	−0.072	−0.048	−0.491*	−0.702**
	3.8~4.0 km	0.196	0.001	−0.039	0.001	−0.509*	−0.712**
	4.0~4.2 km	0.124	0.050	−0.135	−0.050	−0.603**	−0.703**
	4.2~4.4 km	0.084	0.052	−0.076	−0.049	−0.579**	−0.702**
	4.4~4.6 km	0.082	0.051	−0.098	−0.049	−0.575**	−0.702**
	4.6~4.8 km	0.100	0.051	−0.088	−0.048	−0.562**	−0.702**
	4.8~5.0 km	0.090	0.051	−0.085	−0.049	−0.573**	−0.703**
	5.0~5.2 km	0.097	0.051	−0.079	−0.048	−0.572**	−0.702**
	5.2~5.4 km	0.098	0.051	−0.086	−0.048	−0.566**	−0.702**
	5.4~5.6 km	0.100	0.052	−0.078	−0.047	−0.584**	−0.702**
	5.6~5.8 km	0.065	0.055	−0.062	−0.052	−0.549**	−0.701**
	5.8~6.0 km	−0.003	0.039	0.080	−0.069	−0.447*	−0.683**

注：**表示在0.01级别（双尾）相关性显著，*表示在0.05级别（双尾）相关性显著。

积在0.05级别相关性显著。位于海拔3600~3800 m、3800~4000 m及5800~6000 m的冰湖数量与冰川面积在0.05级别相关性显著。其余各区域冰湖数量和面积均与冰川面积在0.01水平呈显著负相关。

昆仑山冰湖位于干旱半干旱高山区，气温和降水主要通过影响冰川面积和冰川消融速率进而影响冰湖的变化，其与冰湖变化之间的相关性均不显著。冰川融水作为干旱区冰湖的主要补给来源，在气温等环境因子的影响下，冰川加速融化导致了冰川退缩，由此产生的大量冰川融水为冰湖的孕育和扩张提供了充足的补给来源，是导致新疆昆仑山近20 a冰湖数量和面积迅速增加的直接原因，冰川的变化是制约冰湖发展的重要因素。

现有研究表明，冰湖变化是气候变化、冰川变化、湖盆环境等多种因素综合作用的结果，不同地区冰湖变化的主要影响因素各不相同。喜马拉雅地区和天山山脉受全球变暖的影响，气温升高导致区域冰川快速退缩，冰川湖泊不断增加[50-51]。念青唐古拉山冰湖扩张速率同时受到气温和降水的影响[13]。青藏高原地区冰湖扩张的主要驱动因素是冰川融水的增加，同时受降水量和流域蒸散量制约[52]，与本研究中昆仑山冰湖变化机制最为相似。

4 结 论

本文基于GEE平台进行监督分类，分析了近20 a来昆仑山地区冰湖面积的时空变化特征，从气温、降水和冰川面积变化等方面进行驱动力分析，结论如下：

（1）2000—2020年，昆仑山地区冰湖数量与面积总体表现出数量增多、面积增大的趋势，但增长幅度有所下降。截至2020年，该地区共有冰湖数量894个，总面积达50.83 km^2。冰湖数量和面积增长量分别为39.25%和81.35%。研究区冰湖数量和面积均表现出西多东少的特点。西昆仑山冰湖数量平均每年增长11.6个，东昆仑山年均冰湖增长数接近于0；西昆仑山面积年均增长率为4.26%，东昆仑山面积年均增长率为3.78%。

（2）不同规模的冰湖对气候的响应不同，面积小于0.1 km^2的冰湖对气候变化更敏感，增长速度最

快,平均每年增长13.45个。面积大于0.2 km²的冰湖占比最大,其次为小于0.1 km²的冰湖,占比分别为55.17%和26.03%。昆仑山冰湖主要集中在海拔4600~5600 m,冰湖数量增加主要在海拔4800~5000 m,面积增加集中在海拔5200~5400 m。

(3)昆仑山冰湖数量和面积与气温和降水均无显著相关性,与冰川面积呈显著负相关,表明冰川面积是影响冰湖变化的主要因素。近20 a昆仑山冰川面积退缩21.15%,冰川退缩带来的积雪融水是导致冰湖数量增加、面积增大的直接原因。

参考文献(References):

[1] 姚晓军, 刘时银, 韩磊, 等. 冰湖的界定与分类体系——面向冰湖编目和冰湖灾害研究[J]. 地理学报, 2017, 72(7): 1173-1183. [Yao Xiaojun, Liu Shiyin, Han Lei, et al. Definition and classification systems of glacial lake for inventory and hazards study[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(7): 1173-1183.]

[2] 张威, 王宁练, 李想, 等. 近20 a西喀喇昆仑地区吉尔吉特河流域冰川面积变化及其对气候变化的响应[J]. 山地学报, 2019, 37(3): 347-358. [Zhang Wei, Wang Ninglian, Li Xiang, et al. Glacier changes and its response to climate change in the gilgit river basin, western Karakorum Mountains over the past 20 years[J]. Mountain Research, 2019, 37(3): 347-358.]

[3] 刘建康, 张佳佳, 高波, 等. 我国西藏地区冰湖溃决灾害综述[J]. 冰川冻土, 2019, 41(6): 1335-1347. [Liu Jiankang, Zhang Jiajia, Gao Bo, et al. An overview of glacial lake outburst flood in Tibet, China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2019, 41(6): 1335-1347.]

[4] 陈亚宁, 李稚, 方功焕, 等. 气候变化对中亚天山山区水资源影响研究[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 18-26. [Chen Yaning, Li Zhi, Fang Gonghuan, et al. Impact of climate change on water resources in the Tianshan Mountains, Central Asia[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 18-26.]

[5] 车涛, 李新, P. K. Mool, 等. 希夏邦马峰东坡冰川与冰川湖泊变化遥感监测[J]. 冰川冻土, 2005, 27(6): 801-805. [Che Tao, Li Xin, P K Mool, et al. Monitoring glaciers and associated glacial lakes on the east slopes of Mount Xixabangma from remote sensing images[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, 27(6): 801-805.]

[6] 王欣, 刘时银, 莫宏伟, 等. 我国喜马拉雅山区冰湖扩张及其气候意义[J]. 地理学报, 2011, 66(7): 895-904. [Wang Xin, Liu Shiyin, Mo Hongwei, et al. Expansion of glacial lakes and its implication for climate changes in the Chinese Himala ya[J]. Acta Geographica Sinca, 2011, 66(7): 895-904.]

[7] 丁悦凯, 刘睿, 张翠兰, 等. 喜马拉雅地区叶如藏布流域冰川和冰湖变化遥感监测研究[J]. 干旱区地理, 2022, 45(6): 1870-1880. [Ding Yuekai, Liu Rui, Zhang Cuilan, et al. Remote sensing monitoring of glacier and glacial lake changes in Yairu Zangbo Basin, Himalayas[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(6): 1870-1880.]

[8] 苏鹏程, 李昊, 汪洋, 等. 喜马拉雅山中段冰湖体积估算与规模分级标准初探[J]. 山地学报, 2022, 40(1): 96-105. [Su Pengcheng, Li Hao, Wang Yang, et al. Volume estimation method for glacial lakes based on V-A relationship and its scale classification in central Himalaya[J]. Mountain Research, 2022, 40(1): 96-105.]

[9] 陈晓清, 崔鹏, 杨忠, 等. 近15 a喜玛拉雅山中段波曲流域冰川和冰湖变化[J]. 冰川冻土, 2005, 27(6): 793-800. [Chen Xiaoqing, Cui Peng, Yang Zhong, et al. Changr in glaciers and glacier lakes in Boiqu River Basin, Middle Himalayas during lsat 15 years[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, 27(6): 793-800.]

[10] 宫鹏, 姚晓军, 孙美平, 等. 1967—2014年科西河流域冰湖时空变化[J]. 生态学报, 2017, 37(24): 8422-8432. [Gong Peng, Yao Xiaojun, Sun Meiping, et al. Spatial-temporal variations of glacial lakes in the Koshi River basin from 1967 to 2014[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(24): 8422-8432.]

[11] 贺鹏, 童立强, 郭兆成, 等. 基于地形起伏度的冰湖溃决隐患研究——以希夏邦马峰东部为例[J]. 自然资源遥感, 2022, 34(1): 257-264. [He Peng, Tong Liqiang, Guo Zhaocheng, et al. A study on hidden risks of glacial lake outburst floods based on relief amplitude: A case study of eastern Shihapangma[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2022, 34(1): 257-264.]

[12] 李海, 杨成生, 惠文华, 等. 基于遥感技术的高山极高山区冰川冰湖变化动态监测——以西藏藏南希夏邦玛峰地区为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(5): 10-17. [Li Hai, Yang Chengsheng, Hui Wenhua, et al. Changes of glaciers and glacier lakes in alpine and extremely alpine regions using remote sensing technology: A case study in the Shisha Pangma area of southern Tibet[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(5): 10-17.]

[13] 陶静, 赵文吉, 王旭, 等. 念青唐古拉山西段冰湖时空变化分析[J]. 干旱区研究, 2021, 38(3): 618-628. [Tao Jing, Zhao Wenji, Wang Xu, et al. Spatial changes of the glacial lakes in the western Nyainqentanglha Range[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(3): 618-628.]

[14] 程尊兰, 时亮, 刘建康, 等. 帕隆藏布江上游冰湖分布及其变化[J]. 水土保持通报, 2012, 32(5): 8-12. [Cheng Zunlan, Shi Liang, Liu Jiankang, et al. Distribution and change of glacier lakes in the upper Palongzangbu River[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, 32(5): 8-12.]

[15] 闫斌, 贾洪果, 任文静, 等. 基于NDWI-NDSI组合阈值法的布加岗日冰湖提取及其变化分析[J]. 遥感学报, 2022, 26(11): 2344-2353. [Yan Bin, Jia Hongguo, Ren Wenjing, et al. Glacier lake extraction and variation analysis of the Bujiagangri glacier based on the NDWI- NDSI combination threshold method[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2022, 26(11): 2344-2353.]

[16] 雷鹏嗣, 王伟财, 张太刚. 1990-2020年那曲地区冰湖变化研究

[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2022, 58(6): 936-944. [Lei Pengsi, Wang Weicai, Zhang Taigang. Changes in glacial lakes in Naqu from 1990 to 2020[J]. Journal of Beijing Normal University(Natural Science), 2022, 58(6): 936-944.]

[17] 张圆. 西藏尼都藏布流域冰湖遥感监测及冰湖溃决洪水模拟[D]. 兰州: 西北师范大学, 2022. [Zhang Yuan. Remote Sensing Monitoring of Glacial Lake and Simulation of Glacial Lake Outburst Floods in Niduzangbo Basin, Tibet[D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2022.]

[18] 王文. 彼得藏布流域冰湖遥感监测和灾害风险评估[D]. 成都: 四川师范大学, 2022. [Wang Wen. Remote Sensing Monitoring and Hazard Risk Assessment of Glaclal Lakes in Bedezangbu river Basin[D]. Chengdu: Sichuan Normal University, 2022.]

[19] 曾磊, 杨太保, 田洪阵. 近40年东帕米尔高原冰川变化及其对气候的响应[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(5): 144-150. [Zeng Lei, Yang Taibao, Tian Hongzhen. Response of glacier variations in the eastern Pamirs plateau to climate change, during the last 40 years[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, 27(5): 144-150.]

[20] 贺广丽. 喀喇昆仑-喜马拉雅山冰湖接触型冰川变化与冰湖演化研究[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2021. [He Guangli. Lake-ice Contacted Glacier Changes and Glacial Lake Evolution in the Karakorum-Himalayan[D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2021.]

[21] 王欣, 吴坤鹏, 蒋亮虹, 等. 近20年天山地区冰湖变化特征[J]. 地理学报, 2013, 68(7): 983-993. [Wang Xin, Wu Kunpeng, Jiang Lianghong, et al. Wide expansion of glacial lakes in Tianshan Mountains during 1990-2010[J]. Acta Geographica Sinica, 2013, 68(7): 983-993.]

[22] 陈晨, 郑江华, 刘永强, 等. 近20年中国阿尔泰山区冰川湖泊对区域气候变化响应的时空特征[J]. 地理研究, 2015, 34(2): 270-284. [Chen Chen, Zheng Jianghua, Liu Yongqiang, et al. The response of glacial lakes in the Altay Mountains of China to climate change during 1992-2013[J]. Geographical Research, 2015, 34(2): 270-284.]

[23] 李宇宸, 张军, 刘陈立. Sentinel-2影像的云南千湖山细小冰湖提取方法[J]. 测绘科学, 2021, 46(4): 114-120. [Li Yuchen, Zhang Jun, Liu Chenli. Extraction method of alpine small glacial lake in Qianhu Mountain area of Yunnan Province baesd on Sentinel-2 image[J]. Science of Surveying and Mapping, 2021, 46(4): 114-120.]

[24] Zhao H, Wang S, Liu X B, et al. Exploring contrastive representation for weakly-supervised glacial lake Extraction[J]. Remote Sensing, 2023, 15(5): 1456.

[25] Wang J X, Chen F, Zhang M M, et al. ACFNet: A feature fusion network for glacial lake extraction based on optical and synthetic aperture radar images[J]. Remote Sensing, 2021, 13(24): 5091-5091.

[26] Su P C, Liu J J, Li Y, et al. Changes in glacial lakes in the Poiqu River basin in the central Himalayas[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2021, 25(11): 5879-5903.

[27] Wang Y Z, Li J, Wu L X, et al. Estimating the changes in glaciers and glacial lakes in the Xixabangma Massif, Central Himalayas, between 1974 and 2018 from multisource remote sensing data[J]. Remote Sensing, 2021, 13(19): 13193903.

[28] Ahmed R, Ahmad S T, W Gowhar Farooq, et al. Glacial lake changes and the identification of potentially dangerous glacial lakes (PDGLs) under warming climate in the Dibang River Basin, Eastern Himalaya, India[J]. Geocarto International, 2022, 37(27): 17659-17685.

[29] Rawat M, Ahmed R, Jain S K, et al. Glacier-glacial lake changes and modeling glacial lake outburst flood in Upper Ganga Basin, India[J]. Modeling Earth Systems and Environment, 2022, 9(1): 507-526.

[30] 位宏, 徐丽萍, 张正勇, 等. 新疆冰湖溃决灾害风险评价与预警[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(29): 13-19. [Wei Hong, Xu Liping, Zhang Zhengyong, et al. Evaluation and early warning of Xinjiang glacial lake outburst disaster risk[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(29): 13-19.]

[31] Rinzin S, Zhang G Q, Wangchuk S. Glacial lake area change and potential outburst flood hazard assessment in the Bhutan Himalaya [J]. Frontiers in Earth Science, 2021, 9: 775195.

[32] Zhang G Q, Yao T D, Xie H J, et al. An inventory of glacial lakes in the Third Pole region and their changes in response to global warming[J]. Global and Planetary Change, 2015, 131: 148-157.

[33] 杜维波. 昆仑山植物多样性格局及其形成机制[D]. 兰州: 兰州大学, 2021. [Du Weibo. Patterns of Plant Diversity and Formation Mechanism in the Kunlun Mountains[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2021.]

[34] 张连成, 胡列群, 李帅, 等. 基于RS的昆仑山区夏季雪线高程变化及其影响因素分析[J]. 冰川冻土, 2019, 41(3): 546-553. [Zhang Liancheng, Hu Liequn, Li Shuai, et al. Analyses of variation of summer snowline elevation and its influencing factors in the Kunlun Mountains based on RS, 2001-2015[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2019, 41(3): 546-553.]

[35] 彭妍菲, 李忠勤, 姚晓军, 等. 基于多源遥感数据和GEE平台的博斯腾湖面积变化及影响因素分析[J]. 地球信息科学学报, 2021, 23(6): 1131-1153. [Peng Yanfei, Li Zhongqin, Yao Xiaojun et al. Area change and cause analysis of Bosten Lake based on multi-source remote sensing data and GEE platform[J]. Journal of Geo-information Science, 2021, 23(6): 1131-1153.]

[36] 姬梦飞, 汤军, 高贤君, 等. 基于Google Earth Engine的鄱阳湖面积时空变化及驱动因素分析[J]. 水文, 2021, 41(6): 40-47. [Ji Mengfei, Tang Jun, Gao Xianjun, et al. Analysis of spatiotemporal changes and driving factors of Poyang Lake area based on Google Earth Engine[J]. Journal of China Hydrology, 2021, 41(6): 40-47.]

[37] 冉伟杰, 王欣, 郭万钦, 等. 2017—2018年中国西部冰川编目数据集[J]. 中国科学数据, 2021, 6(2): 195-204. [Ran Weijie, Wang Xin, Guo Wanqin, et al. A dataset of glacier inventory in Western

China during 2017- 2018[J]. China Scientific Data, 2021, 6(2): 195-204.]
[38] Randy M, Christian H, Holger F, et al. Glacial lake depth and volume estimation based on a large bathymetric dataset from the Cordillera Blanca, Peru[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2020, 45(7): 1510-1527.
[39] 杨成德, 王欣, 魏俊峰, 等. 基于3S技术方法的中国冰湖编目[J]. 地理学报, 2019, 74(3): 544-556. [Yang Chengde, Wang Xin, Wei Junfeng, et al. Chinese glacial lake inventory based on 3S technology method[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(3): 544-556.]
[40] 王巨. 基于时序NDVI植被变化检测与驱动因素量化方法研究——以河西地区为例[D]. 兰州: 兰州大学, 2020. [Wang Ju. Methods for Detecting Vegetation Changes and Quantifying the Driving Factors Using NDVI Timeseries by Taking Hexi as a Case Area[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2020.]
[41] 王佃来, 刘文萍, 黄心渊. 基于Sen+Mann-Kendall的北京植被变化趋势分析[J]. 计算机工程与应用, 2013, 49(5): 13-17. [Wang Dianlai, Liu Wenping, Huang Xinyuan. Trend analysis in vegetation cover in Beijing based on Sen+Mann-Kendall method[J]. Computer Engineering and Applications, 2013, 49(5): 13-17.]
[42] Chen F, Zhang M M, Guo H D, et al. Annual 30 m datas et for glacial lakes in High Mountain Asia from 2008 to 2017[J]. Earth System Science Data, 2021, 13(2): 741-766.
[43] 殷永胜, 王欣, 刘时银, 等. 1990—2020年中国冰湖变化特征及影响因素[J]. 湖泊科学, 2023, 35(1): 358-367. [Yin Yongsheng, Wang Xin, Liu Shiyin et al. Characteristics and influence factors of the glacial lake changes in China from 1990 to 2020[J]. Journal of Lake Sciences, 2023, 35(1): 358-367.]
[44] 李成秀. 昆仑山冰川和积雪变化的遥感监测[D]. 兰州: 兰州大学, 2014. [Li Chengxiu. Remote Sensing Monitoring of Glacier and Snow Cover Changes in the Kunlun Mountain[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2014.]
[45] 张亚男, 胡小飞, 潘彦菲. 北祁连山和东昆仑山的地貌特征对比及其对构造抬升的指示意义[J]. 第四纪研究, 2022, 42(3): 809-822. [Zhang Yanan, Hu Xiaofei, Pan Yanfei. Comparison of geomorphic characteristics between the Northern Qilian Shan and Eastern Kunlun Shan and its indications for tectonic uplift[J]. Quaternary Sciences, 2022, 42(3): 809-822.]
[46] 杨宗佶, 董悟凡, 柳金峰, 等. 川西藏东地区冰湖主要成因类型与分布规律[J]. 地质通报, 2021, 40(12): 2071-2079. [Yang Zongjie, Dong Wufan, Liu Jinfeng, et al. Genetic types and distribution of glacial lakes in western Sichuan and eastern Tibet[J]. Geological Bulletin of China, 2021, 40(12): 2071-2079.]
[47] Yao T D, Li Z G, Yang W, et al. Glacial distribution and mass balance in the Yarlung Zangbo River and its influence on lakes[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(20): 2072-2078.
[48] Yao T D, Thompson L, Yang W, et al. Dfferent glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings[J]. Nature Climate Change, 2012, 2(9): 663-667.
[49] Shean D E, Bhushan S, Montesano P. A systematic, regional assessment of High Mountain Asia glacier mass balance[J]. Frontiers in Earth Science, 2020, 7(7): 363-382.
[50] 李达, 上官冬辉, 黄维东. 1998—2017年天山麦兹巴赫冰川湖面积变化研究[J]. 冰川冻土, 2020, 42(4): 1126-1134. [Li Da, Shangguan Donghui, Huang Weidong. Research on the area change of Lake Merzbacher in the Tianshan Mountains during 1998-2017[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(4): 1126-1134.]
[51] Pandey P, Ali S N, Champati Ray P K. Glacier-glacial Lake interactions and glacial lake development in the central Himalaya, India(1994-2017)[J]. Journal of Earth Science, 2021, 32(6): 1563-1574.
[52] Liu W H, Xie C W, Zhao L, et al. Rapid expansion of lakes in the endorheic basin on the Qinghai-Tibet Plateau since 2000 and its potential drivers[J]. CATENA, 2021, 197: 104942.

Analysis of temporal and spatial characteristics and driving forces of Kunlun glacial lakes

MENG Chengfeng[1], ZHONG Tao[1], ZHENG Jianghua[1,2], WANG Nan[1],
LIU Zexuan[1], REN Xiangyuan[3]

(1. College of Geography and Remote Sensing Sciences, Xinjiang University, Urumqi 830017, Xinjiang, China;
2. Key Laboratory of Oasis Ecology, Xinjiang University, Urumqi 830017, Xinjiang, China; 3. College of Ecology and Environment, Xinjiang University, Urumqi 830017, Xinjiang, China)

Abstract: Investigating the variable features of Kunlun glacier lakes is crucial for the development of the local ecological environment. The area and number of glacial lakes in the Kunlun Mountains have changed over the past 20 years, and this paper used supervised classification based on the Google Earth Engine remote sensing cloud platform to study the changes. It also examined the driving factors of temperature, precipitation, and glacier area. The findings indicate: (1) There were 39.25% more glacial lakes in the Kunlun Mountains in 2020 than there were in 2000, and the area expanded by 81.35%, with a distribution pattern of more lakes in the west and fewer lakes in the east. (2) The Kunlun Mountain glacial lakes are primarily found at an altitude of 4600−5600 m, and the number and area of glacial lakes account for 71.58% and 70.51% of the total, respectively. These glacial lakes have a smaller area than 0.1 km^2 and are more sensitive to climate change. (3) The temperature and precipitation in the Kunlun Mountains declined by 3.45%, 6.27%, and 21.15% from 2000 to 2020, respectively, as did the glacier area. The primary cause of the expansion of glacial lakes is the meltwater produced by glacier melting. The study's findings may provide empirical justification for the preservation and use of water resources as well as for catastrophe warnings in dry regions.

Keywords: remote sensing; glacial lake of Kunlun Mountains; GEE; climate change; driving force analysis